Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 1, 2024. (93-106)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Design, Construction, and Experimental Investigation of Parabolic Solar Cooker Performance

Research Article

Nasser Baharlou-Houreh[1], Ali Sadeghi[2], Saeed Golshadi[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.82768.1190

1. Introduction

Among the unique uses of solar energy is the use of solar ovens to collect and strengthen the energy of the sun for cooking food and boiling water. In general, three types of solar ovens have been studied by researchers, namely indirect solar ovens, solar ovens with vacuum tubes, and parabolic solar ovens. Parabolic ovens include a concentrator, a base, supports, a movable arm, and a pan-holding jaw. In the design of this oven, the holder of the container should be placed in the focal point of the parabolic oven. In this research, a parabolic solar oven was designed, built, and tested using extensive and regular mirror work. Among the innovations of the current research, the following can be mentioned:

- Using available and cost-efficient materials
- High ability to upgrade and repair the device
- The possibility of making and using stoves for teaching in schools and universities
- The possibility of changing the angle in all three dimensions of spatial coordinates
- Calculation of energy efficiency in all experiments
- Investigating the effect of container material, container size, container body color, and container lid placement on solar oven performance

2. Design and Construction

According to Figure 1, The equipment of the location of the container should be located at the focal point which is obtained by the equation (1):

$$f = \frac{d^2}{16h} \quad (1)$$

In the above relationship, d is the diameter of the dish and h refers to the depth of the dish, which are 81 and 7.7 cm in this research, respectively. Therefore, the focal distance, f, is equal to 53 cm.

The holding equipment is designed so that the device can change its position in three dimensions. The red arrows in Figure 2 show the methods of moving and adjusting the angle and spatial coordinates in three dimensions. The final shape of the solar oven is shown in Figure 3.

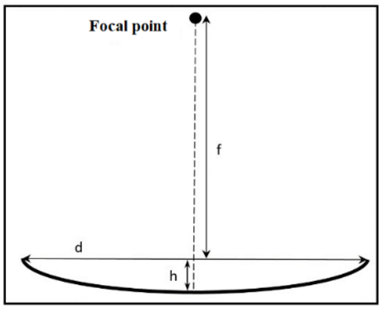


Fig. 1. Schematic of dish and focal point



Fig. 2. Support base and movable arm to adjust the angle in three dimensions



Fig. 3. The actual and final image of the solar oven device

3. Experimental Investigation of Performance

Investigating the effect of different amounts of water in a fixed container on water temperature

In this experiment, different amounts of water were tested inside a copper container of the same size. According to Figure 4, 0.5 L of water reached the boiling point (temperature of 100°C) after 20 minutes. In the same period, 0.75 L of water reached a temperature of 93°C, and 1 L reached a temperature of 85°C.

---

*Manuscript received: June 22, 2023. Revised, June 22, 2023, Accepted, August 1, 2023.

[1] Corresponding author, Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University. **Email**: Nasser.baharloo@sru.ac.ir

[2] B.Eng.student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

[3] B.Eng.student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

Investigating the effect of copper and aluminium container material on water temperature

In this experiment, two copper and aluminum containers with almost equal dimensions were examined with a constant amount of 0.5 L of water. As shown in Figure 5, in 40 minutes, the temperature of the copper and aluminum containers reached 90°C and 78°C, respectively. As a result, in a certain period, the temperature of the water in the copper container rose more than the temperature of the water in the aluminum container. This result can be explained by the higher thermal conductivity of copper metal (398 W/mK) compared to aluminum metal (248 W/mK).

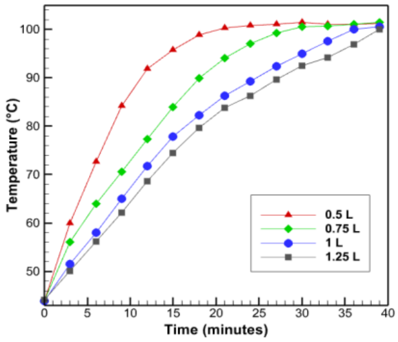


Fig. 4. Solar oven performance test to check different amounts of water in a fixed container

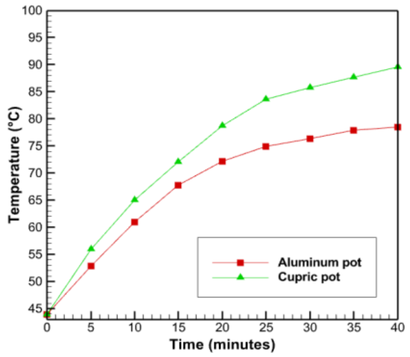


Fig. 5. Solar oven performance test for investigating the effect of container material (copper and aluminum)

Investigating the effect of black color on absorbing the sun's heat

In this experiment, normal and smoked aluminum containers with a constant amount of 0.5 L of water were examined under direct sunlight. As shown in Figure 6, the smoked aluminum container reached the boiling temperature in 25 minutes, while the normal aluminum container reached a temperature of 75°C during this period. The reason might be the high absorption coefficient of black body radiation.

Thermodynamic analysis (energy efficiency calculation)

In this part, thermodynamic analysis was performed to calculate energy efficiency. The input energy rate in the parabolic solar oven as the considered system is the sun energy, which is obtained by:

$$\dot{E}_s = I_{ave} A_{ap} \quad (2)$$

Where, I_{ave} is the average rate of solar radiation input to the parabolic solar oven in a time interval where the value of 941 W/m^2 is considered. A_{ap} refers to the area of the solar concentrator aperture. The rate of thermal energy consumed according to equation (3) is equal to the amount of thermal energy required for water to reach a certain temperature per unit of time:

$$\dot{E}_w = \frac{m_w C_w (T_{w.f} - T_{w.i})}{\Delta t} \quad (3)$$

In the above equation, m_w and C_w are the mass and specific heat capacity of water, respectively, and $T_{w.i}$ and $T_{w.f}$ are the water temperature at the beginning and end of the test period, respectively. In order to check the thermal performance of the built device, the thermal efficiency of the device should also be checked. Using equation (2) and (3), the energy efficiency of the parabolic solar oven is obtained from the following equation:

$$\eta = \frac{\dot{E}_W}{\dot{E}_s} \quad (4)$$

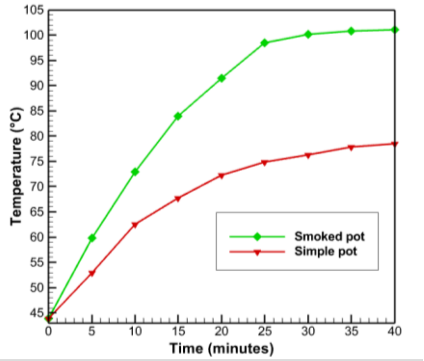


Fig. 6. Solar oven performance test to investigate the effect of black color

Energy calculations for different experiments are obtained according to Table 1. Based on this table, the highest energy efficiency is related to a medium copper container with a closed lid (18.52%).

Table 1 - Energy efficiency for different experiments (%)

Medium copper pot with a fully closed door	18.52
Medium copper pot with a fully open door	7.67
Small copper container with a closed lid	17
Aluminum pot	9.62
Smoked aluminium pot	16.93

4. Conclusion

In this research, a parabolic solar oven with simple usability and educational use was made. Available and cost-efficient materials were used for all pieces of equipment. This device could be upgraded highly and easily. In addition, due to the change of the sun's radiation angle at different hours, it can change the angle in three dimensions of the spatial coordinates. In order to ensure the tests, the repeatability chart was presented and to ensure the accuracy of the results, uncertainty analysis was conducted. The following results were obtained in summary from the experiments:

- A copper container with 0.5 L of water boiled in 20 minutes and 1.5 L of water reached 82°C in this time.
- The temperature of the copper container reached 86°C, while the aluminum container reached 76°C in 30 minutes.
- The smoked and non-smoked aluminum containers reached the temperatures of 100°C and 75°C in 25 minutes, respectively.
- The result of thermodynamic calculations to extract energy efficiency showed that the highest energy efficiency was related to medium copper container with closed lid with 18.52%.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

طراحی، ساخت و بررسی تجربی عملکرد اجاق خورشیدی سهموی *

مقاله پژوهشی

ناصر بهارلو هوره(۱) علی صادقی(۲) سعید گلشادی(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.82768.1190

چکیده با توجه به فراوانی و رایگان بودن انرژی خورشیدی در کشور و مشکلات گازرسانی، اجاق خورشیدی جایگزین بسیار مناسبی جهت پخت غذا به شمار می‌رود. در این مقاله، یک دستگاه اجاق خورشیدی سهموی طراحی، ساخته و آزمایش شد. تجهیزات مورد استفاده در ساخت، شامل دیش سهموی شکل آهنی، آینه‌ها به منظور بازتاب نور روی نقطه کانونی، قوطی و تسمه آهنی به منظور ساخت فک و پایه نگه‌دارنده می‌باشد. از جمله نوآوری دستگاه حاضر می‌توان به استفاده از مواد ارزان‌قیمت، قابلیت بالای ارتقا و تعمیر، کاربری ساده و استفاده آموزشی و قابلیت تغییر زاویه در هر سه بعد مختصات مکانی اشاره کرد. جهت اطمینان از دقت نتایج، نمودار تکرارپذیری ارائه گردیده و آنالیز عدم قطعیت برای همه پارامترها محاسبه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد ظرف با مقدار آب ۰/۵ لیتر در مدت زمان ۲۰ دقیقه به جوش می‌آید و با مقدار آب ۱/۵ لیتر در این مدت زمان به دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. با مقایسه ظرف آلومینیومی و ظرف مسی نتیجه می‌شود در مدت زمان ۳۰ دقیقه دمای آب در ظرف مسی به ۸۶ درجه و در ظرف آلومینیومی به ۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در آزمایش دیگری ظرف آلومینیومی به شکل دودی (مشکی) بررسی شد که مطابق آزمایش، آب در ظرف دودی در مدت زمان ۲۵ دقیقه به جوش می‌آید. مطابق تحلیل ترمودینامیکی که برای محاسبه بازده انرژی در همه آزمایش‌ها انجام پذیرفت، ظرف مسی متوسط با درب بسته با بازده ۱۸/۵۲ درصد و ظرف مسی کوچک با درب بسته با بازده ۱۷ درصد، به ترتیب رتبه اول و دوم را دارا هستند.

واژه‌های کلیدی انرژی خورشیدی، اجاق خورشیدی سهموی، جوش آمدن آب، بازده انرژی، ساخت و آزمایش.

Design, Construction and Experimental Investigation of Parabolic Solar Cooker Performance

Nasser Baharlou-Houreh Ali Sadeghi Saeed Golshadi

Abstract *Considering the abundance and freeness of solar energy in the country and gas supply problems, solar oven is considered a very suitable alternative for cooking food. In this paper, a parabolic solar cooker was designed, built and tested. The equipment used in the construction includes iron parabolic dish, mirrors to reflect light on the focal point, cans and iron belts to make the jaw and support base. Among the innovations of the present device, we can mention the use of cheap materials, the ability to upgrade and repair, simple use and educational use, and the ability to change the angle in all three dimensions of spatial coordinates. To ensure the accuracy of the results, the repeatability chart is presented and the uncertainty analysis is calculated for all parameters. By comparing the aluminum container and the copper container, the result is that the temperature of the water in the copper container reaches 86 degrees and in the aluminum container reaches 76 degrees Celsius in 30 minutes. In another experiment, a smoked (black) aluminum container was checked, and according to the experiment, water in the smoked container boils in 25 minutes. According to the thermodynamic analysis that was done to calculate the energy efficiency in all experiments, the medium copper pot with a closed lid with 18.52% efficiency and a small copper container with a closed lid with 17% efficiency, are ranked first and second respectively.*

Key Words Solar energy, Parabolic solar cooker, Water boiling, Energy efficiency, Construction and testing.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۴/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۵/۱۰می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه حرارت، سیالات و تأسیسات، دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

Email: nasser.baharloo@sru.ac.ir

(۲) دانش آموخته کارشناسی، گروه حرارت، سیالات و تأسیسات، دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

(۳) دانش آموخته کارشناسی، گروه مکانیک، دانشکده شهید مهاجر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، اصفهان.

مقدمه

از جمله کاربردهای بی‌نظیر انرژی خورشیدی استفاده از اجاق‌های خورشیدی جهت جمع کردن و تقویت انرژی خورشید برای پخت غذا و جوشاندن آب هست. به طور کلی سه نوع اجاق خورشیدی [1] تا کنون توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. نوع اول، اجاق خورشیدی غیر مستقیم [2] است که اجزای تشکیل دهنده این نوع اجاق‌ها شامل کلکتور خورشیدی سهموی، واحد پخت، مخزن ذخیره کننده سیال، پمپ و لوله‌های رابط هستند. در این دستگاه‌ها کلکتور خورشیدی در خارج از ساختمان و بقیه بخش‌ها در داخل ساختمان قرار دارند که به وسیله لوله‌های رابط با بخش خارجی مرتبط می‌شوند. کارکرد این اجاق به این صورت هست که سیال عامل توسط پمپ از مخزن به سمت کلکتور خورشیدی هدایت می‌شود و پس از جذب انرژی گرمایی در بخش کلکتور خورشیدی سیال عامل به طرف واحد پخت داخل ساختمان حرکت می‌کند. نوع دوم، اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ [3] است که اجزای تشکیل دهنده این نوع اجاق‌ها شامل یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ همراه با یک مخزن با جنس فولاد ضد زنگ است. اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ یک نوع اجاق خورشیدی مستقیم است که از لوله تحت خلأ و متمرکز کننده خورشیدی آلومینیومی تشکیل شده است که فرایند پخت مواد غذایی در داخل لوله داخلی صورت می‌گیرد. نوع سوم، اجاق خورشیدی سهموی [4] است که اجزای تشکیل دهنده این نوع اجاق‌ها شامل متمرکز کننده، پایه و نگه‌دارنده‌ها، بازوی متحرک و فک نگه‌دارنده ظرف غذا هستند. در این اجاق باید طراحی به‌گونه‌ای باشد که فک و نگه‌دارنده ظرف در نقطه کانونی اجاق سهموی قرار بگیرد و در انواع مختلف، چیدمان آیینه‌ها با توجه به عملکرد و کارایی متفاوت هست. در مقاله حاضر از این نوع اجاق خورشیدی استفاده شده است. اجاق‌های خورشیدی سهموی به دلیل اینکه از بازتابندگی بیشتری نسبت به سایر انواع اجاق‌های خورشیدی بهره می‌برند، می‌توانند در زمان کوتاه‌تری دمای بالاتری را فراهم کنند.

نتو و همکاران [5] ظرفیت پخت یک اجاق خورشیدی جعبه‌ای ساخته شده از عناصر غیر قابل بازیافت را مورد بررسی قرار دادند و یک مدل ریاضی نیز با هدف تخمین دما را مطالعه کردند. دستگاه برای دو پیکربندی، بدون بار و بارگذاری آزمایش شده است. در دستگاه آن‌ها پخت شش کیک (۴/۵۰۰ گرم) با دمای بین۱۴۴/۲ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۴/۵ درجه سانتی‌گراد در ۸۰ دقیقه انجام شد. مدل ریاضی آن‌ها تطابق خوبی بین نتایج نظری و تجربی نشان داد. سنسیل [6] یک اجاق خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده با استفاده از یک دیش جمع کننده سهموی را بررسی کرد. اجاق ساخته شده وی دو سیلندر متحد المرکز با باله‌های داخلی و موم پارافین دارد. میانگین راندمان انرژی و اگزرژی به ترتیب ۲۲٪ و ۲،۶٪ و زمان لازم برای رسیدن آب به ۹۰ درجه سانتی‌گراد با و بدون مواد تغییر فاز دهنده به ترتیب ۱۲۰ دقیقه و ۹۰ دقیقه است. تافیک و همکاران [7] طراحی جدیدی از اجاق خورشیدی مجهز به بازتابنده‌های داخلی و یک بازتابنده سهموی پایینی را ارائه دادند. آزمایش‌های پخت واقعی برای خانواده چهار نفره انجام گردید که سودمندی اجاق خورشیدی پیشنهادی را توصیف می‌کند. راندمان کلی اجاق با و بدون بازتابنده‌ها به ترتیب ۱۰/۷٪ و ۱۲/۵٪ برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که اجاق با بازتابنده قادر به رسیدن به دمای متوسط ~ ۱۴۰–۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است. جیانلوکا و همکاران [8] با طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی ارزان با استفاده از لنز فرنل متمرکز نور، توانستند مقدار زیادی از تابش خورشید را روی یک منطقه کانونی کوچک متمرکز کنند؛ سپس تابش توسط یک آینه به سمت سطح پخت‌وپز، جایی که ظرف می‌تواند قرار گیرد، منعکس می‌شود. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اجاق پیشنهادی می‌تواند با راندمان خوب و کاهش زمان گرمایش به دمای بالا برسد به طوری که ۳ کیلوگرم آب می‌تواند در حدود ۳۰ دقیقه به ۹۰ درجه سانتی‌گراد برسد، در حالی که ۳ کیلوگرم روغن سیلیکون را می‌توان در کمتر از یک ساعت از ۴۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد رساند. احمد و همکاران [4] به طراحی، ساخت و آزمایش اجاق خورشیدی سهموی برای خانوارهای روستایی و کمپ پناهندگان پرداختند. هدف اصلی این اجاق متمرکز کردن تابش خورشید و تبدیل آن به گرما با استفاده از مواد بازتابنده مختلف بود و برخی از عوامل از جمله صاف و براق بودن سطح بازتابنده، متغیرهای کنترلی همچون سنجش دما و متغیرهای کنترل نشده همچون باد و دمای محیط در نظر گرفته شد. خروجی آزمایش‌ها بر اساس مواد بازتابنده فولاد ضد زنگ، فویل آلومینیومی و نوار مایلار مورد مطالعه قرار گرفته شد، همچنین در تحقیق آن‌ها سه شکل مختلف دما اندازه‌گیری شد؛ دمای سطح

متمرکز، دمای ظرف و دمای آب. موفقیت قابل توجه این کار تحقیقاتی در حالتی بود که از نوار مایلار به عنوان ماده بازتابنده استفاده شد. در این حالت حداکثر دمای مشاهده شده در آب ۷۴،۵ درجه سانتی‌گراد، در کاغذ ۱۰۵/۴ درجه سانتی‌گراد و در چوب ۲۳۹ درجه سانتی‌گراد بود.

ال موسایی و همکاران [9] ساختار، عملکرد و آزمایش‌های اجاق حرارتی خورشیدی سهموی را مورد بررسی قرار دادند. اجاق مد نظر در آلمان ساخته شده و برای پاسخگویی به نیازهای ساکنان روستایی و به طور گسترده در مراکش برای استفاده توسط ساکنانی که از چوب‌های جنگلی بهره می‌برند، طراحی شده است که نیاز به دمای پخت پایدار بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد. عملکرد دستگاه آن‌ها بر اساس تابش اشعه خورشید بر روی یک لوله خلأ شیشه‌ای است که منجر به گرم شدن روغن می‌شود. کارکرد دستگاه به این صورت است که روغن داغ شده از طریق دو لوله کوچک که با لوله بزرگ همراه هستند بالا آمده و ظرف حاوی غذای مورد نظر (به ظرفیت ۵ کیلوگرم) را گرم می‌کند. با توجه به نتایج مشاهده شده دمای روغن پخت‌وپز پس از یک ساعت حرارت دیدن به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و پخت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه انجام می‌شود. خراسانی زاده و همکاران [۱۰] به طراحی، ساخت و آزمایش یک اجاق خورشیدی سهموی با سه درجه آزادی به همراه یک صفحه پخت آلومینیومی به منظور پخت نان در شهر کاشان پرداختند. نتایج آن‌ها بازده کلی اجاق را ۵۰٪ نشان داد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده این اجاق می‌تواند در ۸ ماه از سال و حداقل در ۶ ساعت از هر روز آفتابی و در هر ساعت حدود ۱۲ عدد نان با خمیر ۲۰۰ گرمی را پخت کند. حسین زاده و همکاران [11] به طراحی، ساخت و آزمایش یک اجاق خورشیدی سهموی قابل حمل پرداختند. آن‌ها اثر سرعت‌های باد ۴،۲، ۰/۲و ۶ متر بر ثانیه، بر بازده انرژی و اگزرژی را بررسی کردند. با توجه به نتایج آن‌ها در طول آزمایش بازده انرژی ۳۴/۵۲ تا ۴۶/۱۹٪ و بازده اگزرژی آن ۲/۱۱ تا ۵/۶۰ ٪ به دست آمد. آن‌ها طبق نتایج تجربی زمان لازم برای به جوش آوردن ۲ لیتر آب در سرعت باد ۶ متر بر ثانیه را حدود ۴۰ دقیقه به دست آوردند. رحیم زاده و همکاران [12] به طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی سهموی و قابل حمل پرداختند که از قطاع‌های جمع شونده از جنس پلکسی و آبکاری آلومینیومی شده استفاده کردند. با توجه به نتایج آن‌ها یک ظرف از جنس آلومینیوم با توجه به دریافت ۱۰۱۲ وات بر متر مربع تشعشع ورودی خورشید، می‌تواند ۰/۵ لیتر آب را در مدت حدودا ۱۷ دقیقه به نقطه جوش برساند. حسین زاده و همکاران [3] به بررسی یک اجاق خورشیدی با لوله تحت خلأ پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده مدت‌زمان لازم برای به جوش آوردن ۸۰۰ گرم آب ۱ ساعت و ۲۵ دقیقه است. همچنین میانگین بازده انرژی اجاق خورشیدی در آزمایش با شدت تابش خورشیدی ۹۰۰ وات بر متر مربع برابر ۱۶/۱۶ درصد است. انوکوای و همکاران [13] به بررسی بازده انرژی و اگزرژی یک اجاق خورشیدی سهموی پرداختند. تجزیه و تحلیل آماری آن‌ها نشان داد تفاوتی بین نتایج تجربی و نظری که به کمک نرم‌افزار مینی‌تب به دست آمده است، نمی‌باشد و متوسط راندمان انرژی اجاق خورشیدی ۳۹ درصد است. ماریسیو گنزالز آویلز و همکاران [14] با طراحی و ساخت یک اجاق خورشیدی سهموی و با استفاده از یک مکانیزم مشاهده آنلاین به بررسی حرارتی اجاق پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند بهره‌وری حرارتی اجاق خورشیدی ۲۰ درصد و قدرت پخت آن ۷۵ وات می‌باشد. رگاتیری و همکاران [15] به طراحی و ساخت و تست چندین نمونه اجاق خورشیدی، به منظور تعیین بهترین شکل و بهره‌وری بالا پرداختند. طبق یافته‌های آن‌ها اجاق خورشیدی سهموی با بهره‌وری حدودا ۱۴–۱۸ درصد بهترین عملکرد را دارد.

همان گونه که بیان گردید مطالعات زیادی به منظور ارزیابی عملکرد اجاق‌های خورشیدی صورت گرفته است اما مواردی همچون آموزش صفر تا صد ساخت اجاق خورشیدی، استفاده از مواد ارزان قیمت، تغییر زاویه قرارگیری اجاق در سه بعد و تحلیل ترمودینامیکی از جمله خلأهای مطالعات پیشین بوده است. در این تحقیق یک اجاق خورشیدی سهموی با استفاده از آینه‌کاری گسترده و منظم طراحی، ساخته و آزمایش شد. از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. استفاده از مواد در دسترس و ارزان‌قیمت در ساخت دستگاه.
۲. قابلیت بالای ارتقا و تعمیر دستگاه.
۳. امکان ساخت و استفاده اجاق برای آموزش در مدارس و دانشگاه‌ها.
۴. قابلیت تغییر زاویه در هر سه بعد مختصات مکانی.

۵. محاسبه بازده انرژی در همه آزمایش‌ها.

۶. بررسی تأثیر جنس ظرف، اندازه ظرف، رنگ بدنه ظرف و بررسی تأثیر نحوه قرارگیری درب ظروف بر عملکرد اجاق خورشیدی.

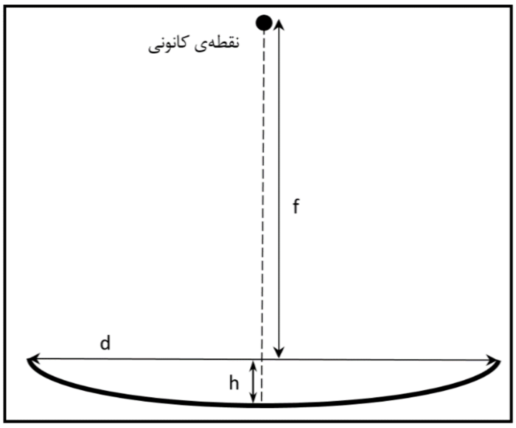
طراحی و ساخت

محاسبه نقطه کانونی

مطابق شـــکل (۱)، تجهیز محل قرارگیری ظرف باید در نقطه کانونی که به وسیله فرمول (۱) به دست می‌آید، قرار بگیرد [4].

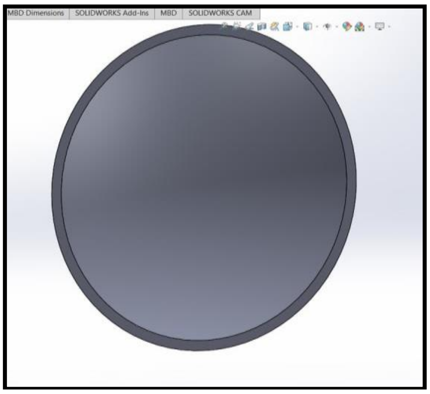
$$f = \frac{d^2}{16h} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق d قطر دیش و h عمق دیش هست که در این تحقیق به ترتیب مقادیر ۸۱ سانتی‌متر و ۷/۷ سانتی‌متر هستند؛ بنابراین فاصله کانونی، f، برابر ۵۳ سانتی‌متر به دست می‌آید.

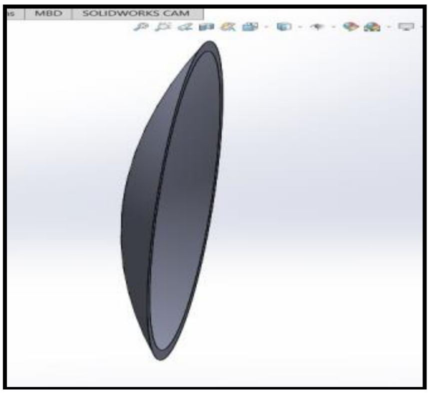


شکل ۱ شماتیک دیش و نقطه کانونی

با توجه به شکل (۱) و مشخصات موجود از اجاق خورشیدی، از نرم‌افزار سالیدورک برای طراحی سه بعدی قسمت متمرکز کننده اجاق خورشیدی به منظور به دست آوردن مساحت سطح روی آن استفاده شده است. در شکل (۲) مدل‌سازی و طراحی نهایی قسمت متمرکز کننده اجاق خورشیدی در نرم‌افزار سالیدورک قابل مشاهده هست. با توجه به مدل‌سازی انجام شده مساحت سطح متمرکز کننده ۰/۵۳۲۹۷۱ متر مربع به دست آمده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ مدل‌سازی ۳ بعدی متمرکز کننده در نرم‌افزار سالیدورک: الف) نمای روبه‌رو، ب) نمای جانبی

تجهیزات مورد استفاده

دیش سهموی شکل. با هدف استفاده از مواد ارزان قیمت و در دسترس از یک دیش سهموی دست دوم که از قبل در اختیار محققان بود، استفاده شد. به طور کلی دیش هر قدر عمق کمتری داشته باشد سایه کمتری تولید کرده و فاصله کانونی بیشتر خواهد شد. دیش مورد استفاده در این تحقیق مطابق شکل شماتیک ۱ اجاق خورشیدی دارای قطر ۸۱ سانتی‌متر و عمق ۷/۷ سانتی‌متر است.

آینه‌ها. مدیریت و بازگرداندن بیشترین مقدار ممکن از اشعه خورشید توسط انعکاس به ظرف، یکی از عوامل مهم در کارکرد مناسب اجاق است. میزان بازتاب آینه ۹۵٪ است در صورتی که آلومینیوم جلا داده شده ۸۵٪ است. لذا برای بهره‌گیری از بیشترین بازتاب از آینه استفاده شده است. در این اجاق حدودا ۴۳۵ عدد آینه استفاده شده است.

قوطی پروفیل آهن و تسمه آهنی. باید سازه‌ای طراحی شود

که از استحکام بالایی برخوردار باشد تا در شرایط جوی و باد دچار مشکل نشود. برای ساخت پایه و فک نگه‌دارنده ظرف از قوطی آهنی استفاده شده است تا ضمن استحکام بخشیدن به اجاق و مقاومت در برابر شرایط جوی و باد، تعادل ظرف را نیز برقرار کند. همچنین به دلایل ذکر شده و نیز اتصال بهتر اجزا، از تسمه آهنی مطابق شکل (۳) استفاده شده است.



شکل ۳ استفاده از تسمه آهنی برای استحکام و اتصال

پیچ و مهره و چسب. برای اتصال تسمه به دیش و ساخت پایه متحرک و اتصال آن‌ها به هم از پیچ و مهره استفاده می‌شود. همچنین برای چسباندن آیینه‌ها به صفحه دیش از چسب آکواریوم استفاده می‌شود. این چسب‌ها به دلیل اینکه مدت تقریبا زیادی طول می‌کشد تا خشک شوند برای این کار بسیار مناسب هستند چون برای تنظیم آیینه‌ها به فرصت کافی احتیاج هست.

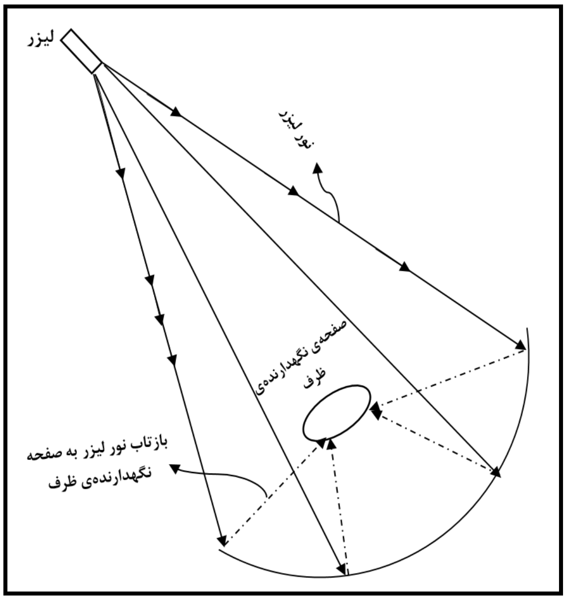
اتصال و اسمبل قطعات

ابتدا قوطی‌ها به‌اندازه‌های مشخص به حالت ۹۰ درجه به یکدیگر جوش داده می‌شود و تقریبا از وسط، آن‌ها را دو چاک می‌دهیم تا انتهای قوطی‌ها به یکدیگر برسند و آن‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند و برای محکم‌تر شدن و سنگین‌تر شدن آن بین دو قوطی هم دوتکه دیگر قرار می‌گیرد و جوش داده می‌شود. برای تغییر درجه صفحه و تنظیم آن به سمت خورشید باید بازویی محرک ساخته شود. به همین منظور دو تکه تسمه در انتهای پایه جوش داده می‌شود و دو قوطی طوری قرار می‌گیرند که قوطی کوچک‌تر بتواند داخل قوطی بزرگ‌تر آزادانه حرکت کند. روی قوطی کوچک‌تر با فاصله‌های ۲ سانتی‌متر سوراخ قرار می‌گیرد تا در هر درجه‌ای که مورد نیاز است، قرار گیرد و ثابت شود (شکل ۴). فلش‌های قرمز رنگ در شکل (۴) نشان‌دهنده روش‌های حرکت و تنظیم زاویه و مختصات مکانی در سه بعد هست.



شکل ۴ پایه نگه‌دارنده و بازوی متحرک جهت تنظیم زاویه در سه بعد

آیینه‌ها به اشکال مربعی ۳/۵ در ۳/۵ سانتی‌متر برش داده می‌شود. برش‌های کوچک‌تر باعث یکپارچه شدن آیینه‌ها و اختلاف ارتفاع کمتر و تنظیم دقیق آن‌ها به سمت فاصله کانونی می‌شود. روش‌های مختلفی برای تنظیم کردن زاویه آیینه‌ها وجود دارد. در این آزمایش صفحه دیش را با زاویه دلخواهی قرار می‌دهیم و کاغذی را در صفحه‌ی کوچک به‌جای ظرف قرار می‌دهیم و لیزری را بافاصله چند متری از صفحه دیش و در همان زاویه صفحه قرار می‌دهیم. لیزر در همان جایی که قرار دارد به‌عنوان جایگزین خورشید است و به ترتیب نور لیزر را در تک‌تک آیینه‌ها می‌اندازیم. اگر نور لیزر به وسط صفحه کاغذی برخورد کرد یعنی زاویه آیینه مناسب است (شکل ۵). شکل نهایی دستگاه اجاق خورشیدی به صورت شکل (۶) است.



شکل ۵ نحوه تنظیم زاویه آیینه‌ها



شکل ۶ تصویر واقعی و نهایی دستگاه اجاق خورشیدی

تحلیل ترمودینامیکی (محاسبه بازده انرژی)

در این قسمت، تحلیل ترمودینامیکی با هدف محاسبه بازده انرژی صورت می‌پذیرد [16].

نرخ انرژی ورودی در اجاق خورشیدی سهموی به‌عنوان سیستم در نظر گرفته‌شده، انرژی خورشید است که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\dot{E}_s = I_{ave}A_{ap} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) I_{ave} میانگین نرخ تابش خورشیدی ورودی به اجاق خورشیدی سهموی در یک فاصله زمانی است که مقدار ۹۴۱ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است [17]. A_{ap} نیز مساحت دهانه متمرکز کننده خورشیدی است که در بخش طراحی و ساخت به دست آمد. نرخ انرژی حرارتی مصرف شده مطابق رابطه (۳) برابر است با مقدار انرژی گرمایی مورد نیاز برای رسیدن آب به دمای مشخص بر واحد زمان [17,18]:

$$\dot{E}_w = \frac{m_w C_w (T_{w.f} - T_{w.i})}{\Delta t} \qquad (۳)$$

در رابطه بالا، m_w و C_w به ترتیب جرم و ظرفیت گرمای ویژه آب، $T_{w.i}$ و $T_{w.f}$ نیز به ترتیب بیانگر دمای آب در ابتدا و انتهای مدت زمان آزمایش است. برای آزمایش‌هایی که آب در آنها به نقطه جوش می‌رسد، نقطه نهایی را همان نقطه جوش در نظر می‌گیریم و واحد زمانی Δt نیز مدت زمانی است که بر حسب ثانیه طول می‌کشد تا آب به دمای ۱۰۰ درجه برسد.

جهت بررسی عملکرد حرارتی دستگاه ساخته شده باید بازدهی حرارتی دستگاه نیز مورد بررسی قرار بگیرد که با استفاده از رابطه (۲) و (۳)، بازده انرژی اجاق خورشیدی سهموی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\dot{E}_W}{\dot{E}_s} \qquad (۴)$$

محاسبات برای آزمایش‌های مختلف بر اساس روابط فوق و داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده، انجام گردیده و در آخرین بخش مقاله آورده شده‌است.

بررسی تجربی عملکرد

عدم قطعیت

آنالیز عدم قطعیت برای همه آزمایش‌ها با استفاده از روش مفات [19] انجام گرفت. اگر پارامتر F با استفاده از تابعی مطابق رابطه زیر محاسبه شود:

$$F = f(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_N) \qquad (۵)$$

مقدار عدم قطعیت در اندازه‌گیری و یا محاسبه پارامتر F از رابطه زیر حساب می‌شود.

$$\delta F = \left\{ \sum_{i=۱}^{N} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (۶)$$

در رابطه بالا، Δx_i عدم قطعیت در اندازه‌گیری یا محاسبه متغیر x_i است. برای پارامترهایی که به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند؛ عدم قطعیت همان دقت وسیله اندازه‌گیری است. تنها متغیری که به صورت مستقیم اندازه‌گیری می شود دما می‌باشد که عدم قطعیت آن ۰/۵ درجه سلسیوس است. عدم قطعیت کلیه پارامترها با استفاده از رابطه (۶) حساب شده و در جدول (۱) بیان شده است. دماسنج دیجیتالی از نوع دماسنج دیجیتالی tes-۱۳۰۶ ساخت کمپانی Tes تایوان می‌باشد.

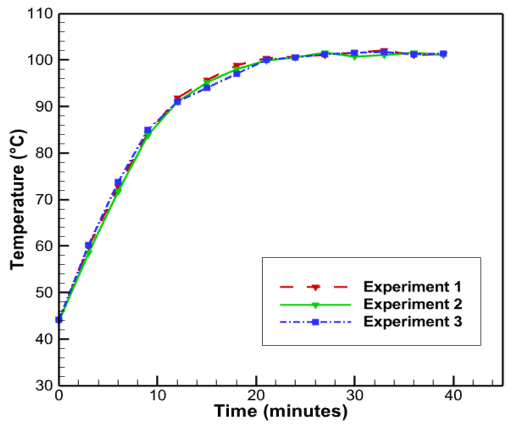
جدول ۱ عدم قطعیت کلیه مشخصه‌های محاسبه شده

پارامتر	نماد	واحد	عدم قطعیت
دمای محیط (دماسنج جیوه‌ای)	$T_{amb.ave}$	°C	±۰/۵
دمای آب (دماسنج دیجیتالی)	$T_{w.f}$	°C	±۰/۵
زمان (کورنومتر دیجیتالی)	Δt	s	± ۰/۰۱
نرخ انرژی حرارتی	$\dot{E}_w$	W	±۱/۲
بازده انرژی اجاق	η	درصد	±۰/۴

تکرارپذیری

برای اطمینان از صحت داده‌های اندازه‌گیری و افزایش دقت

نتایج، هر آزمایشی حداقل سه مرتبه تکرار شده است. برای مثال در شکل (۷) نتایج حاصل از سه مرتبه تکرار در آزمایش ۱ که مربوط به ۰/۵ لیتر آب در ظرف مسی اندازه متوسط بود، نشان داده شده است. در همه نمودارها میانگین نتایج سه تکرار به‌عنوان داده نهایی ارائه شده است.



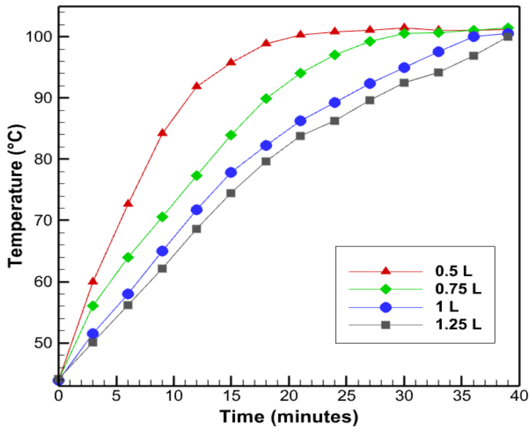
شکل ۷ نمودار تکرارپذیری

بررسی تأثیر مقادیر مختلف آب در یک ظرف ثابت بر دمای آب

در این آزمایش مقادیر متفاوت آب در داخل یک ظرف مسی با اندازه یکسان (قطر کف ظرف مسی ۱۸ سانتی‌متر) مورد آزمایش قرار داده شد. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید در این آزمایش به‌طور میانگین ۴۶ تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد بود. با توجه به نمودار شکل (۸) طبق آزمایش‌های انجام شده مقدار ۰/۵ لیتر آب پس از گذشت ۲۰ دقیقه به نقطه جوش (دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌رسد. در همین مدت مقدار ۰/۷۵ لیتر آب به دمای ۹۳ درجه سانتی‌گراد، ۱ لیتر آب به دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد و ۱/۲۵ لیتر آب به دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسند.



(الف)



(ب)

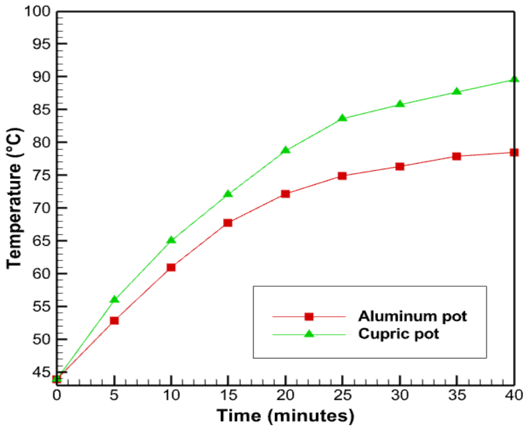
شکل ۸ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی مقادیر مختلف آب در یک ظرف ثابت: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف مسی متوسط و ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

بررسی تأثیر جنس ظرف مسی و آلومینیومی بر دمای آب

در این آزمایش دو ظرف مسی و آلومینیومی با ابعاد تقریبا برابر (قطر کف ظرف حدودا ۱۶ سانتی‌متر) با مقدار ثابت ۰/۵ لیتر آب بررسی شد. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید به طور میانگین از ۳۴ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد متفاوت بوده است. همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است در مدت زمان ۴۰ دقیقه ظرف مسی به دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و ظرف آلومینیومی به دمای ۷۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسند. در نتیجه در یک مدت معین دمای آب در ظرف مسی بیشتر از دمای آب در ظرف آلومینیومی بالا می‌رود. علت این نتیجه را می‌توان بیشتر بودن میزان رسانندگی گرمایی فلز مس ($\frac{W}{mK}$ ۳۹۸) در مقایسه با فلز آلومینیوم ($\frac{W}{mK}$ ۲۴۸) [20]، بیان کرد.



(الف)

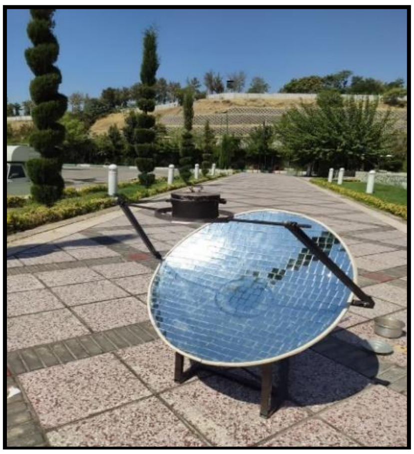


(ب)

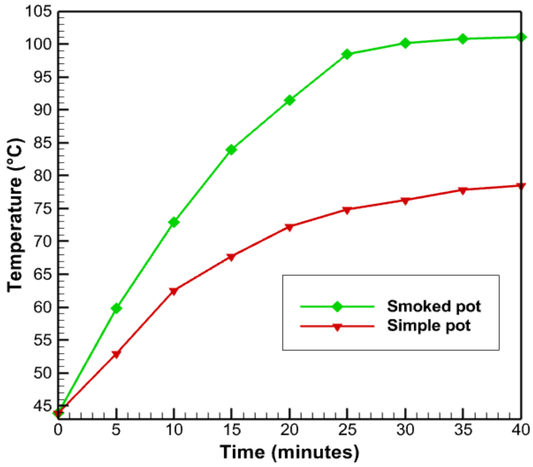
شکل ۹ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر جنس ظرف (مسی و آلومینیومی): الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف آلومینیومی و ب) نمودار نتایج آزمایش

بررسی تأثیر رنگ سیاه به جذب گرمای خورشید

در این آزمایش ظرف آلومینیومی معمولی و دودی شـــده آن با مقدار ثابت ۰/۵ لیتر آب (قطر کف ظرف ۱۶ ســـانتی‌متر) در دمای هوای ۳۶ درجه سانتی‌گراد تحت تابش مستقیم خورشید بررسی شده است. همان طور که در شکل (۱۰) مشخص است ظرف آلومینیومی دودی در مدت ۲۵ دقیقه به دمای جوش می‌رسد در حالی که ظرف آلومینیومی معمولی در طی این مدت به دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است. می‌توان گفت مقدار آب داخل ظرف دودی در مقایســـه با ظرف آلومینیومی معمولی در مدت زمان یکســـان به دمای بالاتری می‌رســـد. علت این امر بالا بودن ضریب جذب تشعشع جسم سیاه است. در واقع هر چه جســـم تیره‌تر باشـــد جذب بالاتر و هر چه روشـــن‌تر باشـــد بازتاب بالاتر دارد.



(الف)



(ب)

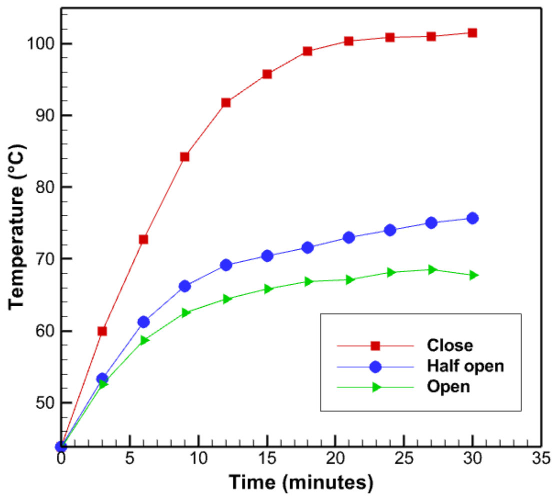
شکل ۱۰ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی بررسی تأثیر رنگ سیاه: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف آلومینیومی دودی و ب) نمودار نتایج آزمایش

بررسی تأثیر نوع قرارگیری درب ظرف به دمای آب

در این آزمـایـش ظرف مســـی (بـا قطر کف ظرف برابر ۱۸ سانتی‌متر) و مقدار ۰/۵ لیتر آب با توجه به نوع قرارگیری درب ظرف (باز، بسته، نیمه‌باز) بررسی می‌شود. دمای هوا تحت تابش مستقیم خورشید به طور میانگین بین ۵۰ تا ۵۴ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده اســـت. مطابق نمودار شـــکل (۱۱)، اگر درب ظرف به‌طور کامل روی ظرف قرار بگیرد (ظرف کاملا در بسته باشد)، آب درون ظرف در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به نقطه جوش می‌رسـد در حالتی که اگر درب ظرف نیمه‌باز و باز باشـــد در همین مدت‌زمان به ترتیب به دمای ۷۳ و ۶۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. می‌دانیم که اگر تابش نور مستقیم باشد دمای بالاتر باید حاصل شـــود اما باز بودن درب ظرف، ســـبب برقراری انتقال حرارت هم‌رفتی می‌شـــود که ســـبب کاهش دمای آب خواهد شـــد. لذا می‌توان گفت تأثیر منفی انتقال حرارت هم‌رفتی بر تأثیر مثبت تابش مستقیم غلبه کرده است. وجود نسیم و باد اگر چه اندک باشد در افزایش ضریب انتقال حرارت هم‌رفتی تأثیر مستقیمی دارد که در این آزمایش و نیز در هرمنطقه‌ای که اجاق خورشیدی بخواهد استفاده شود تأثیر خواهد گذاشت.



(الف)

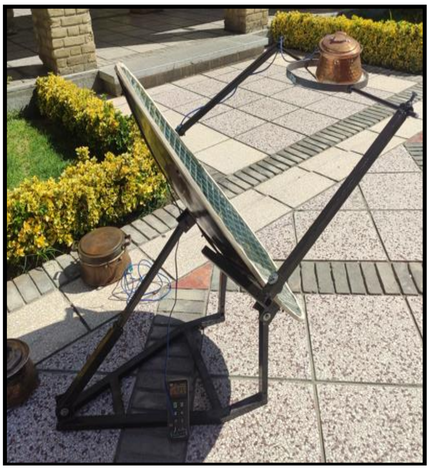


(ب)

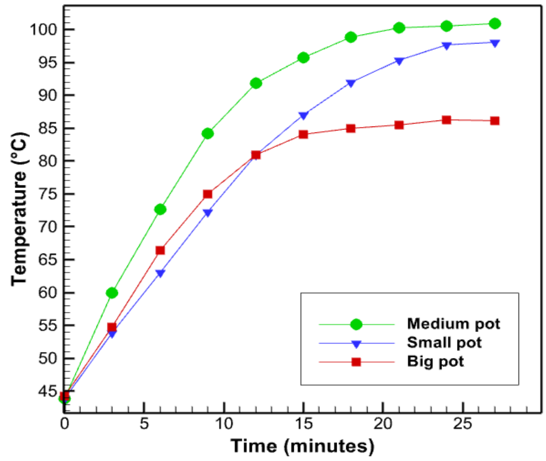
شکل ۱۱ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر نحوه قرار گیری درب ظرف: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظرف مسی با درب باز، ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

بررسی تأثیر اندازه ظرف بر دمای آب

در این آزمایش سه ظرف مسی کوچک (قطر کف ظرف حدود ۱۶ سانتی‌متر)، متوسط (قطر کف ظرف حدود ۱۹ سانتی‌متر) و بزرگ (قطر کف ظرف حدود ۲۲ سانتی‌متر) با مقدار مساوی ۰/۵ لیتر آب بررسی شده است. با توجه به نمودار شکل (۱۲) ظرف مسی متوسط در زمان کمتری نسبت به دو ظرف دیگر به جوش می‌آید. آب موجود در ظرف مسی متوسط در دقیقه ۲۰ به نقطه جوش می‌رسد. در همین زمان، ظرف کوچک‌تر ۶ درجه دمایش پایین‌تر است. دو ظرف مسی با اندازه کوچک و بزرگ تقریبا تا دقیقه ۱۳ رفتار مشابه دارند ولی از دقیقه ۱۳ به بعد ظرف مسی کوچک روند صعودی خود را حفظ کرده ولی روند صعودی ظرف بزرگ ضعیف و در نهایت در محدوده ۸۵ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌شود. برای توجیه این رفتار باید به اندازه پهنای کف ظرف‌ها و نسبت آن با اندازه پهنای نقطه کانونی اشاره کرد. ذکر این نکته به عنوان مقدمه تحلیل ضروری است که نقطه کانونی یعنی محل تمرکز و تجمیع بازتاب نور از آیینه‌ها، در واقع یک نقطه نیست بلکه یک مساحتی شبیه دایره است. از آنجایی که محدوده نقطه کانونی (محل تجمیع نورهای بازتاب شده) مساحتی در حدود ظرف متوسط دارد (قطر ۱۹ سانتی‌متر)، بهینه‌ترین دریافت انرژی توسط ظرف متوسط صورت می‌پذیرد. ظرف کوچک‌تر به دلیل کمتر بودن مساحتش از مساحت محدوده کانونی، از تمام نورهای بازتاب شده نمی‌تواند استفاده کند و بخشی از نورهای بازتاب شده بلا استفاده در محیط منعکس می‌شود. ظرف بزرگ‌تر نیز با وجود اینکه تمام نورهای بازتاب شده را دریافت می‌کند، اما بخشی از مساحت کف ظرف در معرض بازتاب نورها نیست و همین بخش، سهمی از گرمای دریافتی ناشی از بازتاب نورهای تجمیع شده را از طریق رسانش جذب می‌کند و این گرما را از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی به محیط منتقل می‌کند. نهایتا تمام این پدیده‌ها منجر به عملکرد ضعیف‌تر ظرف بزرگ‌تر می‌شود. میزان انتقال حرات از ظرف بزرگ‌تر به محیط به اندازه‌ای است که از دقیقه ۲۰ بعد انتقال حرارت حالت دائم پیدا می‌کند یعنی نرخ دریافت و تحویل حرارت برابر می‌شود و دما در محدوده ۸۵ درجه سانتی‌گراد ثابت می‌ماند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ تست عملکرد اجاق خورشیدی با هدف بررسی تأثیر اندازه ظرف: الف) نمایی از اجاق خورشیدی با ظروف مسی، ب) نمودار حاصل از نتایج آزمایش

نتایج محاسبات انرژی

محاسبات انرژی برای آزمایش‌های مختلف مطابق جدول (۲) به د ست می‌آید. به جهت مقایسه در ست و شرایط یکسان، همه ظرف‌های ا شاره شده در جدول، به اندازه ۰/۵ لیتر آب در خود جای داده‌اند. مطابق جدول بیشترین بازده انرژی مربوط به ظرف مسی متو سط با درب بسته و پس از آن ظرف مسی کوچک با درب بسته و ظرف آلومینومی دودی در رتبه‌های دوم و سوم هستند.

جدول ۲ محاسبات انرژی برای آزمایش‌های مختلف

	انرژی مصرفی (وات)	بازده انرژی (درصد)
ظرف مسی متوسط درب کاملا بسته	۹۲/۸۸۹	۱۸/۵۲
ظرف مسی متوسط درب کاملا باز	۳۸/۴۸۳	۷/۶۷
ظرف مسی متوسط درب نیمه باز	۴۸/۴۳۵	۹/۶۶
ظرف مسی بزرگ با درب بسته	۶۸/۵۰۶	۱۳/۶۶
ظرف مسی کوچک با درب بسته	۸۵/۲۵۹	۱۷
ظرف آلومینومی	۴۸/۲۶۹	۹/۶۲
ظرف آلومینومی دودی	۸۴/۹۲۷	۱۶/۹۳

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک اجاق خورشیدی سهموی با قابلیت کاربری ساده و استفاده آموزشی ساخته شد. نصب مجموعه آیینه‌ها با اندازه کوچک و تعداد بالا با تنظیم دقیق زاویه بر اساس بازتاب نور روی نقطه کانونی صورت پذیرفت. برای کلیه تجهیزات از مواد در دسترس و ارزان قیمت استفاده شد. این دستگاه قابلیت بالا و راحت ارتقا را داراست. همچنین با توجه به تغییر زاویه تابش خورشید در ساعت‌های متفاوت، قابلیت تغییر زاویه در سه بعد مختصات مکانی را داراست. جهت اطمینان از آزمایش‌ها نمودار تکرارپذیری ارائه گردیده و جهت اطمینان از دقت نتایج، آنالیز عدم قطعیت صورت پدیرفته است. نتایج زیر به طور خلاصه از آزمایش‌ها حاصل گردید:

۱. ظرف مسی با مقدار آب ۰/۵ لیتر در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به جوش می‌آید و مقدار ۱۰۵ لیتر آب در این مدت‌زمان به دمای ۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

۲. با مقایسه ظرف آلومینیومی و ظرف مسی نتیجه می‌شود در مدت‌زمان ۳۰ دقیقه درجه حرارت ظرف مسی به ۸۶ درجه سانتی‌گراد و ظرف آلومینیومی به ۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

۳. در بررسی تأثیر رنگ مواد در جذب گرما مشاهده شد که ظرف آلومینیومی دودی و غیر دودی به ترتیب در مدت‌زمان ۲۵ دقیقه به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسند

۴. در بررسی تأثیر نحوه قرارگیری درب ظرف، مطابق آزمایش که اگر درب ظرف به طور کامل روی ظرف قرار بگیرد در مدت‌زمان ۲۰ دقیقه به دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که اگر درب ظرف نیمه‌باز و یا باز باشد در همین مدت‌زمان به ترتیب به دمای ۷۳ و ۶۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد

۵. برای مقایسه اندازه ظرف، عملکرد اجاق خورشیدی با سه ظرف کوچک، متوسط و بزرگ مسی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که محدوده نقطه کانونی مساحتی در حدود ظرف متوسط دارد، بهینه‌ترین دریافت انرژی توسط ظرف متوسط صورت می‌پذیرد. ظرف کوچک‌تر به دلیل کمتر بودن مساحتش از مساحت محدوده کانونی و ظرف بزرگ‌تر نیز به دلیل بیشتر بودن این مساحت، عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند.

۶. نتیجه محاسبات ترمودینامیکی جهت استخراج بازده انرژی، نشان می‌دهد بیشترین بازده انرژی مربوط به ظرف مسی

متوسط با درب بسته با ۱۸/۵۲ درصد است و پس از آن ظرف مسی کوچک با درب بسته با ۱۷ درصد و ظرف آلومینومی دودی با ۱۶/۹۳ درصد به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم هستند.

واژه نامه

Parabolic	سهموی
Focal point	نقطه کانونی
Convection	همرفت
Reflection	بازتاب
Black body	جسم سیاه
Radiation	تشعشع
Absorption	جذب

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق ابلاغ گرنت شماره ۴۹۹۱ مورخ ۱۴۰۲/۰۶/۰۳ انجام گردیده است.

مراجع

[1] U. C. Arunachala and A. Kundapur, “Cost-effective solar cookers: A global review,” *Sol. Energy*, vol. 207, pp. 903-916, (2020)

[2] M. Hosseinzadeh, S. Alizadeh Momen, S. M. Mirzababaee, H. Zamani and A. Kianifar, “Experimental Investigation of Indoor Cooking Using an Indirect Solar Cooker Integrated with Heat Storage Materials,” *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 3, pp. 207-219, (2021).

[3] M. Hosseinzadeh, S. M. Mirzababaee and H. Zamani, “Thermodynamic Analysis of an Evacuated Tube Solar Cooker under Different Operating Conditions,” *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 5, pp. 259-268, (2021).

[4] S. M. M. Ahmed, M. R. Al-Amin, S. Ahammed, F. Ahmed, A. M.Saleque and M. Abdur Rahman, “Design, construction and testing of parabolic solar cooker for rural households and refugee camp,” *Sol. Energy*, vol. 205, pp. 230-240, (2020).

[5] R. V. P.Neto, L. G. M.de Souza, J. C.de Lima, L. G. V. M. de Souza and E. V.Mendes, “Theoretical-experimental study of a box-type solar oven made from disused recyclable elements,” *Sol. Energy*, vol. 230, pp. 732-746, (2021).

[6] R. Senthil, “Enhancement of productivity of parabolic dish solar cooker using integrated phase change material,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 34, pp. 386-388, (2021).

[7] M. A. Tawfik, A. A. Sagade, R. Palma-Behnke, H. M. El-Shal and W. E. Abd Allah, “Solar cooker with tracking-type bottom reflector: An experimental thermal performance evaluation of a new design,” *Sol. Energy*, vol. 220, pp. 295-315, (2021)

[8] G. Coccia, A. Aquilanti, S.Tomassetti, A. Ishibashi and G.Di Nicola, “Design, manufacture and test of a low-cost solar cooker with high-performance light-concentrating lens,” *Sol. Energy*, vol. 224, pp. 1028-1039, (2021).

[9] N. El Moussaoui, S. Tabli, I. Atmane, Kh. Kassmi, K. Schwarzer, H. Chayeb and N. Bachiri “Feasibility of a new design of a Parabolic Trough Solar Thermal Cooker (PSTC),” *Sol. Energy*, vol. 201, pp. 866-871, (2020).

[10] H. Khorasanizadeh, M. Sabzpooshani and S. Nazari, “Design, Manufacture and Testing a Solar Bread Cooker with Concentrator,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 13, pp. 1-13, (2014) [In Persian].

[11] F. Zarrinkalam. M. Hosseinzadeh, H. Zamani, S. M. Mirzababaee and A. Faezian, “Experimental Investigation of the Effect of Wind Speed on the Performance of a Portable Parabolic Solar Cooker from Energy and Exergy Viewpoints,” *Modares Mechanical Engineering*., vol. 20, no. 6, pp. 1525-1532, (2020) [In Persian].

[12] H. Rahimzadeh, M. Nasiri and A. S. Qomi, “Design and construction and thermal investigation of a portable parabolic solar oven,” *27th Annual International Conference of the Iranian Mechanical Engineers Association, Iran*, pp. 3168-3172, April 30, (2019) [In Persian].

[13] A.O. Onokwai, U. C. Okonkwo, C. O. Osueke, C. E. Okafor, T. M. A. Olayanju and S. O. Dahunsi, “Design, modelling, energy and exergy analysis of a parabolic cooker,” *Renew Energy*, vol. 142, pp. 497-510, (2019).

[14] M. González-Avilés, O. R. Urrieta, I. Ruiz and O.M. Cerutti, “Design, manufacturing, thermal characterization of a solar cooker with compound parabolic concentrator and assessment of an integrated stove use monitoring mechanism,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 45, pp. 135-141, (2018).

[15] A. Regattieri, F. Piana, M. Bortolini, M. Gamberi and E. Ferrari, “Innovative portable solar cooker using the packaging waste of humanitarian supplies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, (2017).

[16] M. Hosseinzadeh, M. Sardarabadi, F. Passandideh, “Nanofluid and Phase Change Material Integrated into a Photovoltaic Thermal System,” *Phase Change Materials, Central West Publishing*, Australia, pp. 93-127, (2019).

[17] S. K. Shukla, “Comparison of Energy and Exergy Efficiency of Community and Domestic Type Parabolic Solar Cookers,” *International Journal of Green Energy*, vol. 6, no. 5, pp. 437-449, (2009).

[18] P. M. Cuce, “Box type solar cookers with sensible thermal energy storage medium: A comparative experimental investigation and thermodynamic analysis,” *Sol. Energy*, vol. 166, pp. 432-440, (2018).

[19] R. J. Moffat, “Describing the uncertainties in experimental results,” *Experimental Thermal and Fluid Science*., vol. 1, no. 1, pp. 3-17, (1988).

[20] I. L. Pioro, M. Mahdi and R. Popov, “Heat transfer media and their properties,” *Handbook of Thermal. Science and. Engineering*, pp. 1353-1446, (2018).